

## О ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ ДРОССЕЛЕЙ (РЕАКТОРОВ) С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

И. Д. КУТЯВИН, Н. П. КОСТРИЦКАЯ

(Томский политехнический институт)

В статье приводятся результаты исследования компенсирующих дросселей с воздушным зазором, равным высоте окна сердечника (рис. 1). Сердечник состоит только из панцирного ядра, набранного из С-образных долей, выполненных радиальной шихтовкой трансформаторной стали. Такая конструкция сердечника выбрана с целью максимального снижения добавочных потерь в прессующих устройствах сердечника и в баке.

В статье исследованы дроссели с двумя вариантами обмоток: с многослойными и катушечными.

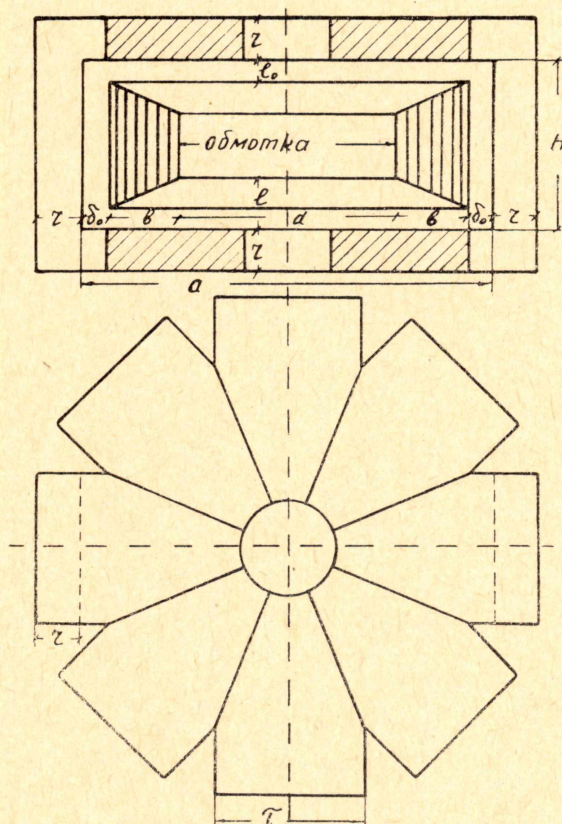


Рис. 1.



Многослойная обмотка с глухим заземлением наружного зажима (конца). Внутренний конец выводится через центральное отверстие в яре и является рабочим выводом. Высота слоев обмотки уменьшается в направлении к центру, поэтому изоляция обмотки каскадно возрастает от наружного слоя к внутреннему.

Регулирование дросселя не рассматривается.

Основные соотношения между размерами дросселя (рис. 1).

Радиальная ширина сечения обмотки:

$$b = mx + (m - 1) \delta, \quad (1)$$

где  $m$  — число слоев в обмотке;

$x$  — радиальная ширина меди слоя;

$\delta$  — радиальное расстояние между медью соседних слоев обмотки, состоящее из ширины осевого охлаждающего канала и изоляции провода на две стороны —  $i$ .

Длина среднего витка обмотки:

$$l_m = \pi (d + b) = \pi (D - b). \quad (2)$$

$D$ ;  $d$  — наружный и внутренний диаметры обмотки.

Площадь сечения материала обмотки:

$$q_m = \frac{mxhy}{y + i}, \quad (3)$$

где  $h$  — высота среднего слоя обмотки;

$y$  — осевой размер элементарного проводника.

Ширина окна сердечника:

$$a = D + 2\delta_{01} = d + 2(b + \delta_{01}). \quad (4)$$

Высота окна сердечника:

$$H = h + 2l_u; \quad (5)$$

где

$$l_u = \frac{l_0 + l}{2}. \quad (6)$$

Ширина стали расщепленных ярем:

$$\tau = D \sin \frac{180}{n}. \quad (7)$$

Площадь сечения стали ярма:

$$q_c = k_c n \tau = k_c n D \sin \frac{180}{n}, \quad (8)$$

где  $n$  — число ветвей расщепленного ярма. Для фиг. 1  $n=8$ . Фирма ВВС применяет  $n=6 \div 12$ .

Расчетная длина стали сердечника, приведенная к  $q_c$ :

$$l_c = H + 2r + 2\delta_{01} + 0,5D \cos \frac{180}{n}. \quad (9)$$

Уравнение теплового баланса среднего слоя обмотки на один погонный сантиметр витка:

$$k_n 2h\epsilon = \rho k_r \Delta^2 \frac{hxy}{y + i}. \quad (10)$$



или

$$\frac{2k_{\pi}\varepsilon}{\rho} = \alpha = k_r \Delta^2 \frac{xy}{y+i} \quad (11)$$

Плотность тока в обмотке в  $a/\text{см}^2$ :

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha(y+i)}{k_r xy}} \quad (12)$$

$\varepsilon$  — плотность теплового потока с поверхности обмотки;

$k_{\pi}$  — коэффициент, учитывающий закрытые части поверхностей слоя обмотки изоляционными деталями;

$\rho$  — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре;

$k_r$  — коэффициент увеличения активного сопротивления обмотки из-за поверхностного эффекта;

$$k_r = 1 + \frac{c^2 m^2 x^4 y^2}{9(y+i)^2} \quad (13)$$

где

$$c = \pi f \frac{\mu_0}{\rho} \quad (14)$$

$f$  — число периодов тока (Гц) и  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$

Мощность дросселя в  $\text{kva}$ :

$$S = 4,44 f 10^{-11} B_v q_v \Delta q_m \quad (15)$$

Приведенная площадь воздушного зазора:

$$q_v = \frac{\pi}{4} (D-b)^2 \quad (16)$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_v = \frac{0,4 \pi I W \sqrt{2}}{H} = \frac{0,4 \pi \sqrt{2} \Delta q_m}{H} \quad (17)$$

Выражение мощности дросселя после подстановки переменных:

$$S = K \frac{m^2 h^2 xy (D-b)^2}{k_r H (y+i)} \quad (18)$$

$$K = 4,44 \cdot 10^{-12} \sqrt{2} \pi^2 \alpha \quad (19)$$

Мощность дросселя (18) является функцией пяти переменных:  $D$ ,  $h$ ,  $m$ ,  $x$  и  $y$  и не имеет ни максимума и ни минимума по переменным  $D$ ,  $h$  и  $y$ . Она увеличивается с ростом этих переменных. Зато при некоторых значениях  $m$  и  $x$  выражение (18) имеет максимум. Для определения критических значений  $m$  и  $x$  воспользуемся условием:

$$\frac{\partial S}{\partial m} = 0 \text{ и } \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

В результате получаем два уравнения:

$$2k_r [D - 2m(x+\delta) + \delta] - mk'_{rm} [D - m(x+\delta) + \delta] = 0, \quad (21)$$

$$k_r [D - 3mx - (m-1)\delta] - xk'_{rx} [D - m(x+\delta) + \delta] = 0, \quad (22)$$

где  $k'_{rm}$  и  $k'_{rx}$  — производные  $k_r$  по  $m$  и  $x$ .

Совместное решение этих уравнений дает следующие соотношения:



$$m_0 = \frac{3(D+\delta)}{5x+7\delta} \quad (23)$$

$$\frac{\sqrt{3} \operatorname{cy} \delta (D+\delta)}{y+i} = U = \frac{(5v+7)}{v^2} \sqrt{\frac{1-v}{1+v}}, \quad (24)$$

где

$$v = x : \delta < 1. \quad (25)$$

Для определения  $x$  можно пользоваться кривой рис. 2, построенной для  $U(v)$  по правой части (24). При этом  $U$  определяется из левой части (24).

Мощность  $S$  слабо зависит от  $y$ , поэтому осевой размер проводника может приниматься в очень широких пределах.

При определении предельной мощности дросселя по условиям транспортных ограничений размеры  $D$  и  $H$  будут ограничиваться максимальными железнодорожными габаритами.

При проектировании дросселя на заданную мощность размер  $D$  можно найти из (18), а высота  $H$  определится каким-либо условием, например, условием минимума суммарного веса активных материалов (стали —  $Q_c$  и меди —  $Q_m$ ), или условием минимума себестоимости дросселя, или условием минимальных расчетных затрат. Эти вопросы в данной статье не рассматриваются.

Мощность дросселя имеет очень сильную зависимость от размера  $\delta$ , уменьшаясь с его ростом. Это видно из пункта 11 табл. 1, данные которой получены при  $y=3$ ;  $i=0,2$ ;  $D=200$ ;  $h=200$ ;  $l_0=10$ ;  $l=30$ ;  $\delta_{01}=10$ ;  $\delta=1,2$ ;  $2$ ;  $2,5$  (все размеры в сантиметрах);  $k_c=0,8$ ;  $k_n=0,6$ ;

$B=16,5 \text{ кгс}$ ;  $\varepsilon=0,16 \frac{\text{ВТ}}{\text{см}^2} n=8$ ;  $c=0,92$  и  $\alpha=9 \cdot 10^4$  — для меди и  $c=0,575$ ;

$\alpha=5,6 \cdot 10^4$  — для алюминия.

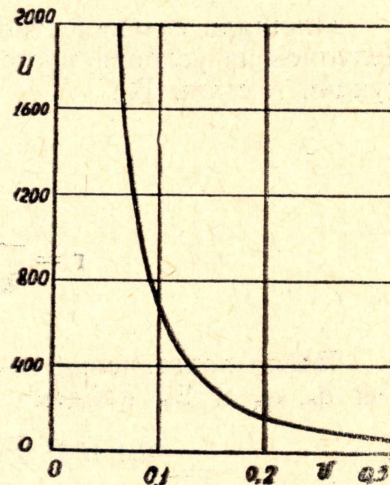


Рис. 2.

Таблица 1

№ п.п.	Материал обмотки	$\delta$	Медь			Алюминий		
			1,2	2,0	2,5	1,2	2,0	2,5
1	U	из (24)	362	609	760	226	378	472
2	V	по рис. 2	0,135	0,106	0,096	0,168	0,137	0,121
3	x	из (25)	0,162	0,212	0,24	0,202	0,274	0,302
4	m	из (23)	65	40	32	64	40	32
5	b	из (1)	87,3	86,5	85,1	88,4	89	87
6	$k_r$	из (13)	1,242	1,27	1,28	1,22	1,29	1,27
7	$\Delta$	из (12)	690	600	560	492	412	396
8	$q_n$	из (3)	1980	1600	1440	2430	2060	1820
9	$B_B$	из (17)	10150	7130	6000	8800	6300	5350
10	$q_B$	из (16)	9900	10050	10400	9750	9650	10060
11	S	из (18)	305	153	112	228	115	86
12	$q_c$	из (28)	6100	4340	3800	5200	3700	3250
13	$g$	из (29)	10,4	7,40	6,46	8,85	6,30	5,53
14	$l_c$	из (9)	373	367	365	370	365	363
15	$l_m$	из (2)	354	357	361	350	349	355
16	$Q_c$	из (27)	17,3	12,1	10,3	14,6	10,3	9,0
17	$Q_m$	из (27)	6,24	5,07	4,62	2,3	1,95	1,75



Как видно из таблицы, некоторые из оптимальных размеров и параметров рассмотренных вариантов дросселей оказались необычными. Получилась большая величина добавочных потерь:

$$p_q \% = (k_r - 1) 100 = 24 \div 29, \quad (26)$$

видимо, присущая многослойной обмотке. Оказалась завышенной и плотность тока в обмотке (пункт 7), что обусловило увеличенные потери в меди.

Веса активных материалов в тоннах (пункты 16 и 17) определялись из выражений:

$$Q_c = \gamma_c q_c l_c 10^{-6} \text{ и } Q_m = \gamma_m q_m l_m 10^{-6}. \quad (27)$$

Площадь сечения стали ярма и радиальный размер ярма  $r$  определялись из условия постоянства магнитного потока при заданной индукции в стали  $B_c$ :

$$q_c = \frac{q_v B_v}{B_c}, \quad (28)$$

$$r = \frac{q_c}{k_c n D \sin \frac{180}{n}}; \quad (29)$$

После подстановки в (28) и (29) выражений для входящих величин  $q_c$ ,  $q_v$  и  $B_v$  найдем

$$r = \frac{0,1 \pi^2 \sqrt{2} m h (D-b)^2}{k_c B_c n H D \sin \frac{180}{n}} \sqrt{\frac{\alpha}{k_r (y+i)}}; \quad (30)$$

Рассмотрим теперь дроссели с непрерывной катушечной, дисковой или винтовой обмотками.

Основные соотношения размеров и параметров.

Радиальная ширина одной стороны обмотки

$$b = m (x + i), \quad (31)$$

где  $m$  — число элементарных проводников в катушке;

$x$  — радиальный размер меди элементарного проводника.

Общая площадь сечения меди одной стороны обмотки

$$q_m = m x y \frac{h}{y + \delta}, \quad (32)$$

где  $\delta$  — осевое расстояние между медью соседних катушек, включающее ширину радиального охлаждающего канала.

Уравнение теплового баланса катушки на один погонный сантиметр ее длины:

$$2\epsilon(k_v b + k_y y) = \rho k_r \Delta^2 m x y, \quad (33)$$

где  $k_v$ ,  $k_y$  — коэффициенты, учитывающие закрытые части поверхностей  $b$  и  $y$  изоляционными деталями.

Обозначим

$$\frac{2\epsilon k_y}{\rho} = \alpha; \quad k_v: k_y = k_n \text{ и } k_n b + y = P. \quad (34)$$

Тогда плотность тока в обмотке из (33)

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha P (x + i)}{k_r v x y}}; \quad (35)$$



Коэффициент увеличения активного сопротивления приведем к следующему виду:

$$k_r = 1 + \frac{c^2 b^2 x^4 y^2}{9(x+i)^2(y+\delta)^2}. \quad (36)$$

Тогда выражение мощности для дросселя с катушечной обмоткой:

$$S = K \frac{bx y h^2 P(D-b)^2}{k_r H(x+i)(y+\delta)^2}. \quad (37)$$

В этом случае мощность дросселя является функцией переменных  $D$ ,  $h$ ,  $b$ ,  $x$  и  $y$ . При увеличении  $D$  и  $h$  мощность дросселя непрерывно возрастает, а при изменении переменных  $b$ ,  $x$  и  $y$  выражение (37) имеет максимум. Для определения критических (оптимальных) значений этих переменных можно воспользоваться условием:

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial y} = 0, \quad (38)$$

Это дает три уравнения:

$$k_r [(k_{\pi} b + P)(D-b) - 2bP] - bP(D-b)k'_{rb} = 0, \quad (39)$$

$$k_r i - x(x+i)k'_{rx} = 0, \quad (40)$$

$$k_r [\delta(y+P) - k_{\pi} b y] - y(y+\delta)Pk'_{ry} = 0, \quad (41)$$

где

$k_{rb}$ ,  $k'_{rx}$  и  $k'_{ry}$  — производные от  $k$  по  $b$ ,  $x$  и  $y$ .

Путем исключения  $k_r$  из (39) и (40), (40) и (41) найдем два новых уравнения:

$$P(D-b)i - (x+2i)[(k_{\pi} b + P)(D-b) - 2bP] = 0; \quad (42)$$

$$(x+2i)[\delta(y+P) - k_{\pi} b y] - i\delta P = 0. \quad (43)$$

Это позволяет заменить сложную систему уравнений (39)–(41) более простой системой (40), (42) и (43). Однако и эта система оказывается очень сложной для совместного решения. Поэтому ограничимся общим совместным решением двух уравнений (40) и (43) относительно  $x$  и  $y$ , а исследование выражения (37) на максимум по переменной  $b$  произведем численно.

Из уравнения (40) после подстановки значений  $k_r$  и  $k'_{rx}$ , найдем

$$3(x+i)(y+\delta) = cbx^2y \sqrt{\frac{2x+3i}{i}}. \quad (44)$$

Значение  $y$  из (43):

$$y = \frac{k_{\pi} b \delta (x+i)}{k_{\pi} b (x+2i) - \delta(2x+3i)}. \quad (45)$$

Подставив  $y$  из (45) в (44), найдем

$$\sqrt{\frac{3(k_{\pi} b - \delta)}{k_{\pi} b^2 ci}} = U = \frac{v}{\sqrt{2v+3}}, \quad (46)$$

$$v = x:i.$$

На рис. 3 приведена кривая, построенная по правой части выражения (46). Определив  $U$  (при известном  $b$ ) из левой части (46), по кривой рис. 3 находим  $v$  и, следовательно,  $x$ .

Результаты исследования выражения (37) на максимум по переменной  $b$  приведены в табл. 2. Исследование произведено при  $k_{\pi} = 0,78$ ;  $k_y = 0,9$ ;  $\delta = 1; 1,2$ ;  $i = 0,01; 0,1$ ;  $\alpha = 13,5 \cdot 10^4$ ;  $l_{\pi} = \delta_{01} = 10$ . Остальные исходные данные равны принятым ранее.



Таблица 2

Значение $b$	10	20	30	50	70	80	90	100
$i = 0,01; \quad \delta = 1$								
1. $U$ из (46)	5,45	3,95	3,26	2,54	2,12	2,02	1,90	1,80
2. $x$ из (46)	0,125	0,085	0,065	0,050	0,040	0,038	0,035	0,032
3. $y$ из (45)	1,24	1,03	0,96	0,90	0,87	0,86	0,85	0,83
4. $k_r$ из (36)	1,038	1,057	1,064	1,092	1,102	1,115	1,119	1,117
5. $\Delta$ из (35)	320	340	350	365	375	378	381	388
6. $g$ из (29)	9,3	15,7	20,3	25,6	26	25	23,3	21
7. $D_b H_b$	239	252	261	271	272	270	267	262
8. $S$ из (37)	55	169	324	650	900	970	1020	1000
9. $Q_c$ из (27)	11,5	20,2	26,7	34,6	35,2	33,6	31,2	27,7
10. $Q_m$ из (27) $_{TH}$	5,45	9,15	12,2	16,5	18,9	19,5	19,8	19,3
$i = 0,1; \quad \delta = 1,2$								
11. $U$ из (46)	1,66	1,23	1,02	0,80	0,67	0,63	0,60	0,58
12. $x$ из (46)	0,29	0,20	0,16	0,12	0,10	0,090	0,085	0,08
13. $y$ из (45)	1,32	1,06	0,95	0,88	0,83	0,81	0,80	0,79
14. $k_r$ из (36)	1,12	1,15	1,16	1,18	1,19	1,19	1,19	1,19
15. $\Delta$ из (35)	336	371	400	436	467	490	495	487
16. $g$ из (29)	7,5	12	14,8	18	18,4	14,9	11,5	8,2
17. $H_b$	235	244	250	256	257	250	243	236
18. $S$ из (37)	34	99	175	323	410	450	454	445
19. $Q_c$ из (27) $_{MBA}$	9,7	16	20	24	25	20	15	11
20. $Q_m$ из (27) $_{TH}$	4,2	6,4	7,7	9,7	10,5	10,3	10,2	10
17 а $D_b$	255	264	270	276	277	270	263	256

Как видно из табл. 2, максимум мощности дросселя  $S(b)$  достигается при  $b \approx 90$ . Однако при  $b > 70 \div 80$  мощность дросселя увеличивается мало, поэтому расчетное значение  $b \approx (0,35 + 0,4) D$ .

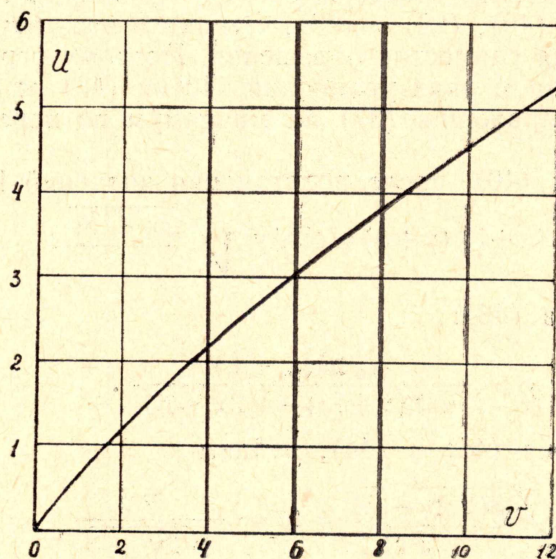


Рис. 3.

Исследования показали эффективность снижения толщины изоляции элементарных проводников для повышения предельной мощности дросселя. Для изоляции параллельных проводников друг от друга необходимо ограничиваться эмалью, витковую изоляцию желательно выполнять полоской из электрокартона или другого материала.



Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что многослойная обмотка при одних и тех же условиях дает меньшую мощность дросселя, чем катушечная.

Для повышения максимальной предельной мощности дросселя по сравнению с данными табл. 2 можно увеличить габаритные размеры выемной части  $H_v$  и  $D_v$  (пункты 7 и 17) до предельно допустимых железнодорожными габаритами, можно также увеличить удельную теплоотдачу с поверхности обмоток с принятого  $\epsilon = 0,16 \frac{\text{бм}}{\text{см}^2}$  до 0,24 при принудительной циркуляции масла.